

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.04.005

真空管太阳能集热器热风干燥试验研究

顾迦毅, 金苏敏

(南京工业大学 能源科学与工程学院, 江苏 南京 211800)

摘要:随着对食品干燥的需求变多,干燥过程往往要消耗大量能源,课题组提出把真空管太阳能集热器和干燥箱结合起来,对物料进行热风干燥。设计一个带有回风系统的干燥箱,采用控制变量法对胡萝卜热风干燥进行试验研究,分析空气流量、热风温度等因素对干燥箱干燥性能的影响。试验表明:空气流量越大,物料的干燥速率越小;当干燥箱进口的热风温度升高时,物料的热质交换更充分,因此干燥进程得以加快。提出的真空管太阳能集热器热风干燥系统可以达到节能目的并有效快速地对物料进行干燥。

关键词:干燥箱;太阳能热风干燥;控制变量法;空气流量;热风温度

中图分类号:TS205;TK124 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)04-0025-05

Experimental Study on Hot Air Drying of Vacuum Tube Solar Collector

GU Jiayi, JIN Sumin

(School of Energy Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: With the development of social economy, people's living standard is increasing day by day, and there is more and more demand for food drying. The drying process often consumes a lot of energy, so the vacuum tube solar collector and the drying oven were combined to dry the materials. A drying oven with return air system was designed, using the control variable method for carrot drying experiment, and the influence of air flow rate and hot air temperature on the oven drying performance was analyzed. The experiment shows that the larger the air flow, the lower the drying rate of materials. When the hot air temperature of the drying box increases, the heat and mass exchange will be more sufficient, thus the drying process can be accelerated. It can be found that the hot air drying system with vacuum tube solar collector can save energy and effectively dry the materials quickly.

Keywords: drying oven; solar hot air drying; control variable method; air flow rate; hot air temperature

物料的干燥处理,有热风干燥、微波干燥、低温吸附干燥等多种方法^[1]。微波干燥与传统干燥方式相比,具有干燥速率大、节能、干燥均匀、清洁生产等优点。低温吸附干燥能够更好地保持物料的结构和品质。热风干燥热效率高,干燥设备结构简单,操作方便,为常用的干燥方法。农作物在潮湿的环境下不易保存,而且为了方便运输,经常对其进行干燥,制成干制品^[2-4]。干燥过程需要消耗很多电能,所以利用真空管太阳能空气集热器结合干燥箱对物料进行干燥。

用真空管太阳能集热器对胡萝卜进行热风干燥试验,研究空气流量、热风温度、干燥箱内空气相对湿度

等因素对真空管太阳能热风干燥性能的影响。

1 试验系统

1.1 试验材料

选取南京菜场的新鲜胡萝卜。选取长度适中、粗细均匀的胡萝卜,洗净后装入保鲜袋放入冰箱中备用。

1.2 干燥箱结构

如图1所示,干燥箱尺寸为50 cm × 50 cm × 75 cm,由不锈钢搭建而成。进风口设置在干燥箱的下部,回风口设置在进风口的对面上部,出风口设置在另一侧上部。干燥箱内部设置4层架子,用来摆放干燥盘。干燥盘用铁丝网制成,规格是50 cm × 50 cm。连

收稿日期:2018-02-26;修回日期:2018-05-16

第一作者简介:顾迦毅(1993),男,江苏海门人,硕士研究生,主要研究方向为太阳能干燥。通信作者:金苏敏(1960),男,江苏南京人,教授、博士生导师,主要研究方向为废热溴化锂吸收制冷、低温技术、热泵技术及其应用。E-mail:smjin@njtech.edu.cn

接干燥箱和真空管太阳能集热器的风管规格为 $\varnothing 80$ mm。在干燥箱和风管的外部包裹保温棉进行保温,减少热损失。

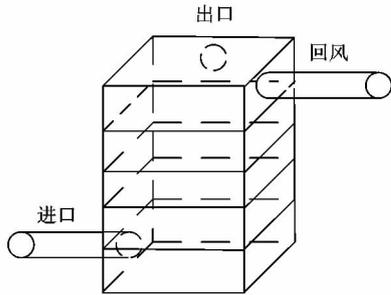


图1 干燥箱结构示意图

Figure 1 Diagram of drying box structure

1.3 真空管太阳能集热器热风干燥系统

真空管太阳能集热器干燥系统如图2所示^[5]。新风进入真空管太阳能空气集热器,太阳能集热器将太阳能转换成热能,对新风进行加热。加热后的干燥空气进入干燥箱对物料进行干燥。干燥箱中的一部分湿空气和新风混合后重新进入太阳能集热器,另一部分排入环境中,如此循环至物料达到干燥要求。加入回风,是为了减少耗能,提升系统的能量利用率。

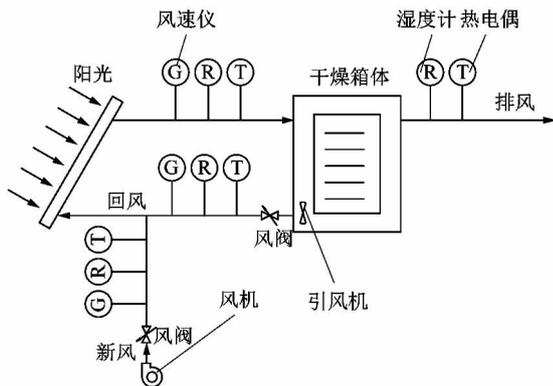


图2 真空管太阳能集热器热风干燥系统示意图

Figure 2 Schematic diagram of hot air drying system of vacuum tube solar collector

1.4 测量仪表

在干燥箱的进口、回风口、出口以及新风处设置温度、湿度、流量的测点。温度、流量、质量采用不同的测量仪表进行测量。

测量胡萝卜质量采用电子秤,电子秤的规格型号是BWS-SN-30,最大称质量值是30 kg,误差 ± 1 g。测量风速采用的是ZRQF智能热球风速仪,工作温度范围 $-10 \sim 40$ $^{\circ}\text{C}$,湿度范围 $0\% \sim 90\%$,测量范围是

$0.05 \sim 30.00$ m/s。

PT100铂热电阻采用三线制接法消除了连接导线电阻引起的测量误差,所以测量温度采用三相PT100铂热电阻,测温范围是 $-200 \sim 400$ $^{\circ}\text{C}$,误差 ± 0.3 $^{\circ}\text{C}$ 。

用干湿球温度计测量干球温度和湿球温度,然后计算出湿度。

1.5 数据采集系统

数据采集系统由温度传感器、数据采集仪和电脑组成。数据采集仪是安捷伦公司的34970A型。温度传感器PT100铂热电阻将温度转换成电信号,传输到数据采集仪,再与电脑中的软件Agilent BenchLink Data Logger连接进行数据处理,最终得到试验所需数据。

2 试验结果与分析

把准备的新鲜胡萝卜切成 $3 \sim 5$ mm厚的薄片,均匀地摆放在干燥盘上。启动风机,等待一段时间后,把干燥盘放入干燥箱开始干燥。改变新风量和回风量,研究各个参数对太阳能热风干燥性能的影响^[6-7]。试验开始后,每隔30 min,取出胡萝卜快速称质量,然后放回继续干燥,当胡萝卜的质量不发生改变时停止干燥。试验结束后,清理并吹干干燥盘,放在清洁卫生的地方以便下次使用。

干燥试验在南京的7月和8月进行,选取了晴天和阴天。试验从早上7时开始,到下午17时结束。对试验数据分析整理,得出各个参数对真空管太阳能集热器干燥箱干燥性能的影响^[8-10]。如表1所示。

表1 胡萝卜干燥方案

Table 1 Scheme of drying for carrots

名称	天气情况	新风流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	回风流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
组合 I	晴天	0.015 0	0.007 5
组合 II	晴天	0.020 0	0.010 0
组合 III	晴天	0.025 0	0.012 5
组合 IV	阴天	0.010 0	0.005 0
组合 V	阴天	0.015 0	0.007 5
组合 VI	阴天	0.020 0	0.010 0

2.1 夏季晴天干燥试验

2.1.1 干燥温度随时刻的变化

当新风流量 $0.020 0$ kg/s ,回风流量 $0.010 0$ kg/s 时,新风温度、干燥箱进口温度和回风温度随时间的变化情况如图3所示。新风温度从早上8点开始升高,到12点达到最高值 41 $^{\circ}\text{C}$,然后开始逐渐下降。干燥箱进口温度从早上从8点开始升高,到12点达到最高值 80 $^{\circ}\text{C}$,然后慢慢降低。干燥箱的回风温度随着干燥

箱的进口温度变化,但是变化不大,维持在 45 ~ 55 °C 之间。

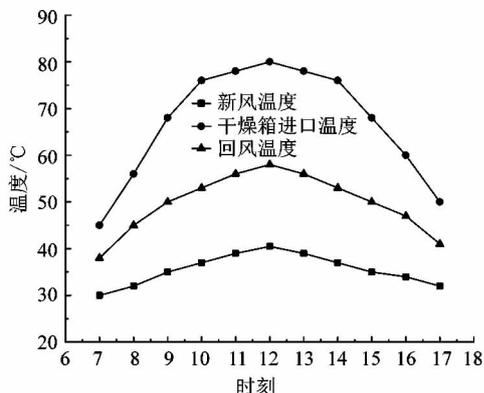


图3 新风流量 0.020 0 kg/s, 回风流量 0.010 0 kg/s 时逐时温度

Figure 3 Time-to-hour temperature change in summer sunny days when fresh air flow is

0.020 0 kg/s and return air flow is 0.010 0 kg/s

2.1.2 夏季晴天不同流量组合下胡萝卜含水质量分数的变化

图4所示为组合 I 时,胡萝卜的含水质量分数从 8 点的 90% 开始下降,到 16 点降到 22%。组合 II 时,胡萝卜的含水质量分数从 8 点的 90% 开始下降,到 16 点 30 分降到 22%。组合 III 时,胡萝卜的含水质量分数从 8 点的 90% 开始下降,到 17 点降到 22%,后面基本保持不变。

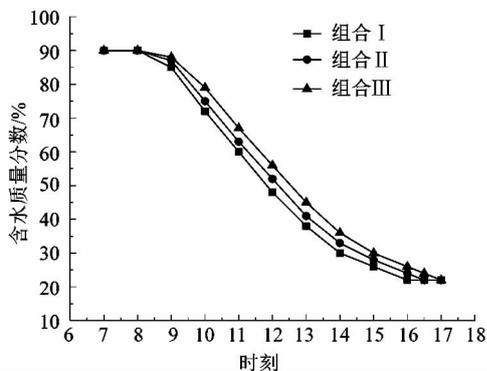


图4 夏季晴天不同流量组合下胡萝卜含水质量分数的变化

Figure 4 Changes of water content under different flow combinations in summer sunny days

2.1.3 夏季晴天不同流量组合下的干燥速率

图5所示,组合 I 时,胡萝卜干燥速率先增大,到 1.1 kg/(m²·h) 处保持不变,然后逐渐减小,到 17 点下降到 0.6 kg/(m²·h);组合 II 时,胡萝卜干燥速率

先增大后基本保持一段时间不变,然后逐渐减小,到 17 点减小到 0.56 kg/(m²·h);组合 III 时,胡萝卜干燥速率先增大后一段时间保持不变,然后减小,到 17 点下降到 0.52 kg/(m²·h)。从图中可以发现,胡萝卜的干燥速率先增大,到一定值时不变,然后逐渐减小,直至干燥停止。

改变回风流量和新鲜流量,不同的流量对胡萝卜的干燥进程有影响。减小干燥箱进口空气流量,干燥箱的进口温度升高,热质交换更充分,胡萝卜的干燥速率增大,因此能够更快地完成干燥。

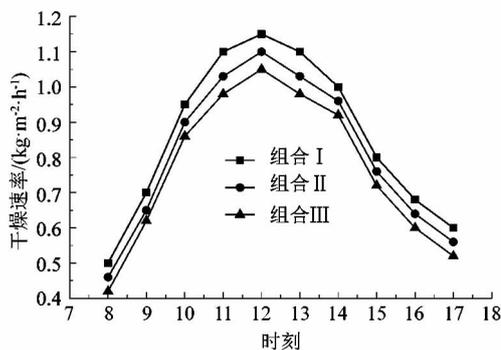


图5 夏季晴天不同流量组合下的干燥速率

Figure 5 Drying rate under different flow combinations in summer sunny days

2.1.4 夏季晴天不同流量组合下的能量利用率

如图6所示,能量利用率随着时刻延续先增加后减少,在 12 点达到最高值。同一时刻,组合 I 的能量利用率高于组合 II 的能量利用率。

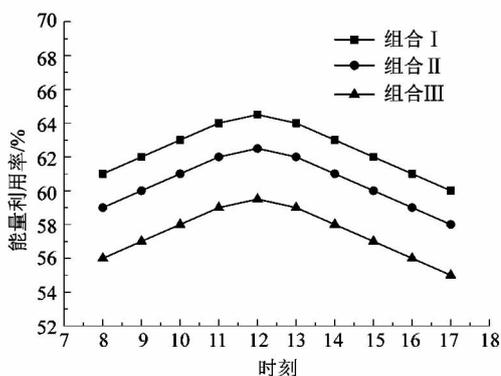


图6 夏季晴天不同流量组合下的能量利用率

Figure 6 Energy utilization rate under different flow combinations in summer sunny days

上午 8—9 点的时候太阳能辐射不是很强,供给干燥箱的干燥热量不是很多,干燥量也较少,所以能量利用率较低。随着太阳能辐射的增强,供给干燥箱的干燥热量增大,干燥量增加的幅度变大,所以能量利用率

逐渐增加。

2.2 夏季阴天干燥试验

2.2.1 干燥温度随时刻的变化

当新风流量 0.020 0 kg/s, 回风流量 0.010 0 kg/s 时, 新风温度、干燥箱进口温度和回风温度随时间的变化情况如图 7 所示。新风温度从早上 8 点开始升高, 到 12 点达到最高值 37 °C, 然后开始逐渐下降; 干燥箱进口温度从早上从 8 点开始升高, 到 12 点达到最高值 55 °C, 然后慢慢降低; 干燥箱的回风温度随着干燥箱的进口温度变化, 但是变化不大, 维持在 40 ~ 45 °C 之间。

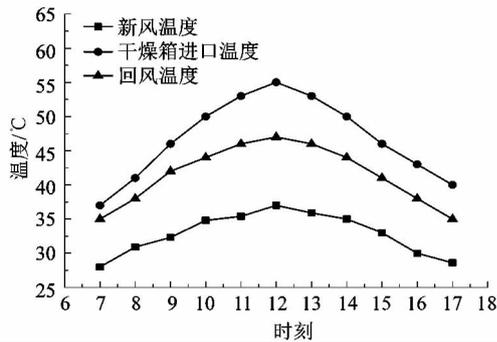


图 7 回风流量 0.01 kg/s 时不同时刻下的温度变化
Figure 7 Time-to-hour temperature change in summer cloudy days when return air flow is 0.01 kg/s

2.2.2 夏季阴天不同流量组合下胡萝卜含水质量分数的变化

如图 8 所示, 组合 IV 时, 胡萝卜的含水质量分数从 8 点的 90% 开始下降, 到 16 点降到 30%; 组合 V 时, 胡萝卜的含水质量分数从 8 点的 90% 开始下降, 到 16 点 30 分降到 30%; 组合 VI 时, 胡萝卜的含水质量分数从 8 点的 90% 开始下降, 到 17 点降到 30%。胡萝卜的含水质量分数下降到 30% 后不再变化, 但胡萝卜并没有完全干燥, 说明夏季阴天胡萝卜干燥比较困难。

2.2.3 夏季阴天不同流量组合下的干燥速率

如图 9 所示, 组合 IV 时, 胡萝卜干燥速率从 0.25 kg/(m²·h) 逐渐增加, 然后减小, 到 16 点下降到 0.25 kg/(m²·h)。组合 V 时, 胡萝卜干燥速率从 0.22 kg/(m²·h) 增加到 0.40 kg/(m²·h), 然后减小, 到 16 点 30 分时下降到 0.22 kg/(m²·h)。组合 VI 时, 胡萝卜干燥速率从 0.20 kg/(m²·h) 增加到 0.37 kg/(m²·h), 到 17 点下降到 0.18 kg/(m²·h)。

从图中可以发现, 胡萝卜的干燥速率随时间先增加, 后稳定在一定值, 然后减小。减小空气流量, 干燥箱进口的温度有所增加, 胡萝卜和空气的热质交换更

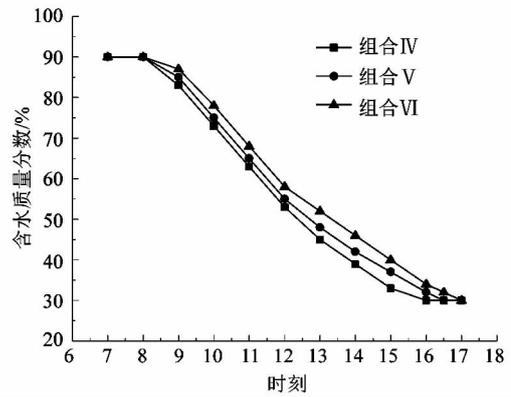


图 8 夏季阴天不同流量组合下胡萝卜含水质量分数的变化

Figure 8 Changes of water content under different flow combinations in summer cloudy days

充分, 因此同一时刻的干燥速率有所增加。总的来看, 夏季阴天的干燥效果不佳, 胡萝卜含水质量分数只能到 35% 左右, 而且干燥量较小, 干燥时间也较长。

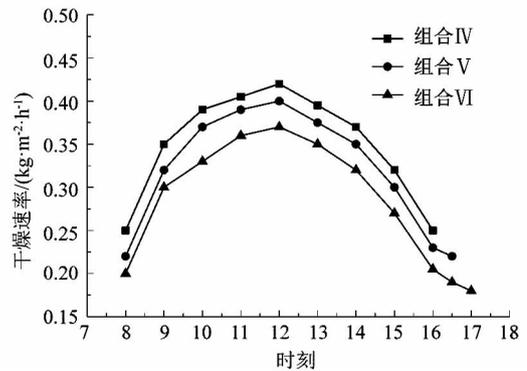


图 9 夏季阴天不同流量组合下的干燥速率

Figure 9 Drying rate under different flow combinations in summer cloudy days

2.2.4 夏季阴天不同流量组合下的能量利用率

图 10 所示为夏季阴天不同回风流量下的能量利用率曲线。能量利用率随着时刻先增加后减少, 在 12 点达到最高值。同一时刻, 组合 IV 时的能量利用率高于组合 V 时的能量利用率。

上午 8—9 点的时候太阳能辐射较弱, 供给干燥箱的干燥热量少, 干燥量也较少, 所以能量利用率较低。随着太阳能辐射的增强, 供给干燥箱的干燥热量增大, 干燥量增加的幅度变大, 所以能量利用率逐渐增加, 但能量利用率总体变化不大。

2.3 夏季晴天和阴天不同流量组合下的干燥速率

夏季晴天和阴天不同流量组合下的干燥速率如图 11 所示。

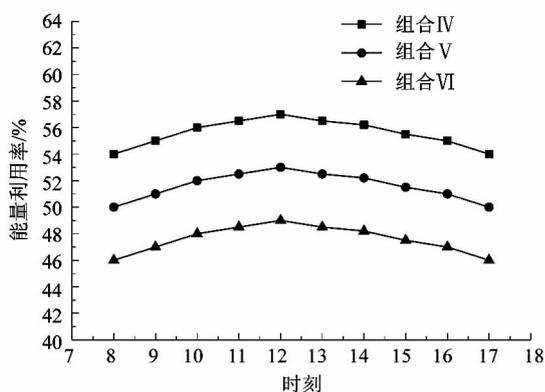


图 10 夏季阴天不同流量组合下的能量利用率

Figure 10 Energy utilization rate under different flow combinations in summer cloudy days

夏季晴天:组合 I 时,干燥量为 8.6 kg;组合 II 时,

干燥量为 8.0 kg;组合 III 时,干燥量为 7.6 kg。

夏季阴天:组合 IV 时,干燥量为 3.3 kg;组合 V 时,干燥量为 2.8 kg;组合 VI 时,干燥量为 2.5 kg。

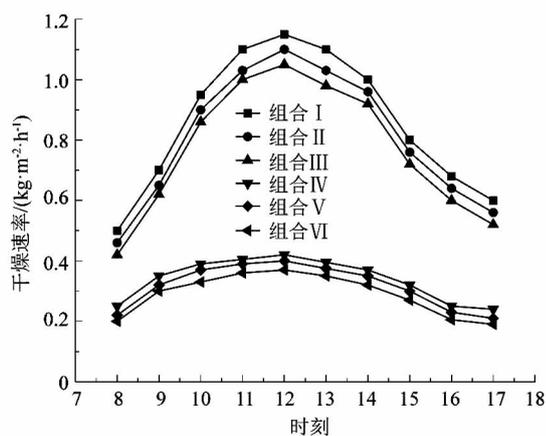


图 11 夏季不同流量组合下的干燥速率

Figure 11 Drying rate under different flow combinations in summer

3 结论

通过对太阳能热风干燥的试验研究可以发现:

1) 随着时间的推移,环境温度先升高后慢慢下降,干燥箱进口温度和回风温度随着环境温度的变化呈现相同的变化趋势。相同回风流量、新风流量的情况下,夏季晴天干燥箱进口温度高于阴天,夏季晴天回风温度高于阴天。

2) 夏季晴天时,胡萝卜的含水质量分数从 8 点开始下降,到 16 点左右保持不变;夏季阴天时,胡萝卜的含水质量分数从 8 点开始下降,到 17 点左右保持不变。空气流量越大,含水质量分数下降的速度越慢,但最终胡萝卜的含水质量分数差不多稳定在 30% 左右。

3) 增大空气流量,干燥箱进口温度降低,胡萝卜的热质交换速度减慢,干燥速率会有一定程度的下降,能量利用率也会下降。新风流量和回风流量相同时,夏季晴天物料的干燥速率大于夏季阴天的干燥速率。

4) 夏季晴天,当新风流量 0.015 0 kg/s,回风流量 0.075 0 kg/s 时,干燥量为 8.6 kg;当新风流量 0.020 0 kg/s,回风流量 0.010 0 kg/s 时,干燥量为 8.0 kg;当新风流量 0.025 0 kg/s,回风流量 0.012 5 kg/s 时,干燥量为 7.6 kg。

夏季阴天,当新风流量 0.010 0 kg/s,回风流量 0.005 0 kg/s 时,干燥量为 3.3 kg;新风流量 0.015 0 kg/s,回风流量 0.075 0 kg/s 时,干燥量为 2.8 kg;当新风流量 0.020 0 kg/s,回风流量 0.010 0 kg/s 时,干燥量为 2.5 kg。

参考文献:

- [1] 蒋赣,罗倩,丁静.不同干燥方法对胡萝卜品质的影响[J].广东农业科学,2011,38(17):67-68.
- [2] 蒋赣,陈蔓琪.胡萝卜热风干燥特性及数学模型研究[J].广东农业科学,2013,22(17):106-110.
- [3] 潘永康.中国现代干燥技术发展概况[J].通用机械,2005(8):42-43.
- [4] 吴云舸,张蓉蓉,王栋明,等.谷物干燥机烘干温度对种子发芽率的影响分析[J].机电工程,2017,34(5):504-508.
- [5] 陈睿.太阳能空气集热热风干燥性能的研究[D].南京:南京工业大学,2016:28-29.
- [6] 潘永康,王喜忠,刘相东.现代干燥技术[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [7] 于才渊,王宝和,王喜忠.干燥装置手册[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [8] 巨浩羽,张茜.基于监测物料温度的胡萝卜热风干燥相对湿度控制方式[J].农业工程学报,2016,32(4):269-276.
- [9] AKTAS M,SEVIK S,AMINI A,et al. Analysis of drying of melon in a solar-heat recovery assisted infrared dryer[J].Solar energy,2016,137:512-515.
- [10] 聂波,张国志.胡萝卜热风干燥特性及其品质[J].河南工业大学学报,2015,36(4):80-84.